

手动调节护理床传动机构的操作舒适性与机械可靠性优化研究

邱 艺

衢州市福杰医疗设备有限公司 浙江 衢州 324000

【摘要】：手动调节护理床因结构简单、成本低、无需电力，在居家养老与基层医疗中应用广泛，但其传动机构存在操作阻力大、行程不合理、自锁性能差、磨损严重等问题，影响护理效率与老人安全。本文基于操作特性与失效机理分析，融合人体工学与机械设计理论，提出传动比分级优化、结构拓扑改进与关键部件耐磨强化的综合方案。优化后操作阻力降低超40%，调节行程与力度符合人体工学标准（15~22N），连续操作10万次仍保持高精度传动与可靠自锁。研究成果完善了手动护理设备优化设计理论，为提升基层养老装备品质提供关键技术支撑，兼具工程实用价值与社会意义。

【关键词】：手动调节护理床；传动机构；操作舒适性；机械可靠性；人体工学；传动比优化

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.035

1 引言

1.1 研究背景与意义

我国人口老龄化加速，基层养老与居家养老对护理设备需求增长。手动调节护理床因无需电力、维护便捷、成本可控，成为满足基层养老护理需求的核心设备之一，可辅助老人完成日常起居，减轻护理人员负担。

当前市场上手动调节护理床传动机构有诸多短板。操作舒适性上，传统传动比设计单一，未适配人体工学，操作阻力大、行程长，调节时有卡顿、冲击；机械可靠性方面，传动构件易磨损、变形，自锁机构设计不合理，连接部位刚性不足。

开展手动调节护理床传动机构的操作舒适性与机械可靠性优化研究，有重要理论与实践意义。理论上，完善优化设计理论体系；实践上，降低操作阻力、提升平稳性，增强耐磨性与自锁可靠性，提升基层养老护理品质。

1.2 研究现状综述

国内外学者围绕护理床传动机构与舒适性、可靠性优化开展大量研究。传动机构研究重点在创新传动形式与拓展调节功能，手动调节多采用丝杆、齿轮、连杆传动等，部分引入助力机构；电动调节聚焦智能控制与精准调节，但手动调节仍不可替代。

操作舒适性优化多从人体工学出发，优化操作手柄，但未充分考虑调节行程与操作频率适配性；机械可靠性优化主要通过材料强化、结构尺寸优化与润滑系统改进，但多针对单一失效形式，未实现多维度综合提升。

现有研究存在不足：操作舒适性未实现传动比与人体特性动态适配；机械可靠性优化缺乏系统性；未建立协同优化机制；针对手动调节护理床传动机构专项研究少。本文针对这些研究空白开展优化研究，提升设计科学性与实用性。

2 相关技术基础与需求分析

2.1 手动调节护理床传动机构结构与工作原理

手动调节护理床传动机构将护理人员手动操作力转化为床体姿态调节动力，实现床体各段平稳转动。典型机构由操作输入、传动放大、执行与自锁模块组成。操作输入模块（如手柄、摇把）接收手动操作力；传动放大模块（如丝杆、齿轮组、连杆）传递并放大操作力；执行模块（如床体连接件、转轴）带动床体调节姿态；自锁模块（如棘爪棘齿、丝杆螺母）锁定调节后姿态。

常见传动形式有丝杆螺母、齿轮-连杆、涡轮蜗杆传动。丝杆螺母传动精度高、自锁好，但操作行程长；齿轮-连杆传动效率高、操作行程短，但自锁差；涡轮蜗杆传动比大、操作省力且自带自锁，但效率低、易磨损。不同传动形式组合可兼顾操作省力与调节平稳。

2.2 操作舒适性需求与人体工学特性分析

手动调节护理床操作舒适性取决于操作力度、行程、平稳性与便捷性。基于人体工学，护理人员操作合理力度为15N-30N，操作行程应在300mm-500mm，调节平稳要求传动顺畅、加速度变化率不超 0.3m/s^2 ，操作便捷要求手柄位置高度适配。

不同体力护理人员需求有差异，女性倾向小操作力，对行程敏感度低；男性注重操作效率，对行程要求高。老年人使用舒适度与调节平稳性相关，操作舒适性优化需兼顾护理人员与老年人体验。

2.3 机械可靠性需求与失效机理分析

手动调节护理床传动机构机械可靠性表现为结构强度、耐磨性、自锁可靠性与长期稳定性。核心需求包括：额定载荷下构件无变形断裂；连续操作10万次后精度下降不超5%；自锁机构无解锁且解锁力适中；连接部位无松动异响。

传动机构主要失效形式有磨损失效、变形失效、自锁失效、连接失效。失效机理为机械疲劳、摩擦磨损与应力集中，受材料、设计、润滑等因素影响。

2.4 操作舒适性与机械可靠性的协同关系

操作舒适性与机械可靠性相互关联、制约。提升操作舒适性可能降低传动构件结构强度，增强机械可靠性可能增加操作阻力影响舒适性。因此，需要建立操作舒适性与机械可靠性的协同优化机制，在“操作省力、调节平稳”与“结构耐用、锁定可靠”间寻求平衡。具体措施如下：优化传动比设计，降低操作阻力并保证构件受力合理；进行结构拓扑优化，减轻重量同时提升结构刚度；做好材料选型与表面强化，提升耐磨性且不增加操作阻力。

3 传动机构操作舒适性优化设计

3.1 基于人体工学的传动比优化

传动比是影响操作力度与行程的核心参数。基于人体工学需求，以床体背部抬起 $0^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 为例建立优化模型，推导操作力与传动比关系。采用分级传动比设计：低档 $i_1 = 1:20$ （操作力 15~22N，适配女性护理人员或精细调节），高档 $i_2 = 1:12$ （行程缩短，适配男性或快速调节）。通过拨叉机构实现档位切换，操作力 $< 5N$ ，切换轻便可靠。结合齿轮啮合、丝杆传动等效率因素对传动比进行修正，并经运动学仿真验证。结果表明，分级设计使操作力度与行程均符合人体工学合理范围（力度适中、行程可控），有效适配不同体力护理人员需求，显著提升调节过程的舒适性、安全性与操作效率。

3.2 操作输入模块人体工学优化

针对操作手柄进行人体工学优化，提升握持舒适度与操作便捷性。通过人体手部尺寸调研，确定手柄的最优握持直径为 35mm~40mm，长度为 120mm~150mm，符合大多数护理人员的手部尺寸。手柄表面采用橡胶材质，增加握持摩擦力，同时降低手部压力；表面设计防滑纹理，纹理深度为 0.5mm~1mm，避免操作过程中打滑。

优化手柄的安装位置与角度，根据护理人员的操作姿势，将手柄安装高度设定为 750mm~850mm，与床体侧面的夹角为 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ，确保操作时手臂自然下垂，减少肌肉疲劳。同时，在手柄附近设置操作指引标识，明确不同调节方向与传动比档位的切换方式，提升操作便捷性。

3.3 传动平稳性优化设计

为提升传动平稳性、减少卡顿与冲击，优化传动机构设计：齿轮传动采用斜齿轮（螺旋角 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ），啮合平稳、噪声低；低档齿轮模数 2.5mm，高档 2mm，兼顾承载能力与操作轻便性。丝杆传动替换为滚珠丝杆，摩擦系数降至滑动丝杆的 $1/10 \sim 1/20$ ，显著降低阻力；两端配置缓冲弹簧（刚度 5~8N/mm），有效吸收姿态转换冲击。连杆铰接部位采用自润滑轴承，替代传统滑动摩擦结构，提升转动灵活性与耐久性。上述结构优化协同作用，显著改善调节过程的平顺性、舒适度与系统可靠性，满足高精度姿态调节需求。

3.4 操作舒适性优化验证

通过人体工学实验验证操作舒适性优化效果。选取 20 名不同体力的护理人员参与实验，分别操作优化前后的传动机构，测试操作力度、操作行程、调节平稳性与握持舒适度四个指标。实验结果表明，优化后的传动机构操作力度控制在 15N~28N，符合人体工学要求；操作行程缩短 25%以上，调节效率提升；调节过程中的最大加速度变化率为 $0.2m/s^2$ ，无卡顿、冲击现象；90%的实验人员认为握持舒适度与操作便捷性显著提升。

4 传动机构机械可靠性优化设计

4.1 基于失效机理的材料选型与强化

针对传动机构主要失效形式，开展材料选型与表面强化优化。传动核心构件如齿轮、丝杆选 40Cr 合金结构钢，其综合力学性能好，能满足承载需求，对其进行表面淬火和低温回火处理，提升硬度、耐磨性与韧性。连杆构件选 20CrMnTi 合金结构钢，铰接部位渗碳处理增强耐磨性。自锁机构的棘爪与棘齿选 GCr15 轴承钢，经淬火回火提升自锁可靠性。非承重构件选 ABS 工程塑料，降低重量且耐腐蚀、易成型。通过材料选型与强化，提升构件耐磨性与抗疲劳性能，延长寿命。

4.2 结构拓扑优化与强度提升

采用拓扑优化法优化传动机构结构，去除冗余材料，提升利用率。以连杆为例，经拓扑优化计算，中部镂空减重，受力集中处增厚提强度。优化齿轮与丝杆结构尺寸，根据承载与传动比确定参数，确保承载与传动精度。优化连接部位设计，用 8.8 级高强度螺栓替代普通螺栓，增加防松垫圈；销钉连接用开口销锁定，提升连接可靠性。

4.3 自锁机构可靠性优化

针对自锁机构易失效问题，用双棘爪棘齿自锁结构替代单棘爪结构，均匀承载，避免单棘爪过度磨损。棘齿用梯形齿，齿面夹角 60° ，兼顾自锁与解锁。优化棘爪与棘齿配合间隙，底部设复位弹簧，确保紧密贴合。增加解锁助力机构，降低操作力，确保操作便捷。

4.4 润滑系统优化设计

良好润滑可减少传动构件磨损，提升可靠性。采用集中与局部润滑结合方式，齿轮箱内飞溅润滑，用 220#极压工业齿轮油；丝杆与螺母脂润滑，用锂基润滑脂。连杆铰接与自润滑轴承加固体润滑剂，无需频繁补油。设计加注口与放油口，便于维护。充润滑油与换齿轮油，通过优化润滑系统，降低传动构件摩擦系数，减少磨损，提升机械可靠性。

4.5 机械可靠性优化验证

通过加速寿命实验和强度测试验证优化效果。加速寿命实验模拟传动机构连续操作 10 万次，测试传动精度、磨损量和

自锁性能。结果显示,连续操作 10 万次后,传动精度下降率 3%低于设计阈值 5%,齿轮与丝杆最大磨损量 0.02mm 远小于允许值 0.1mm,自锁机构无解锁现象,解锁操作力稳定在 12N 左右。强度测试表明,在 1.5 倍额定载荷下,传动构件无永久变形和断裂,连接部位无松动,机械可靠性显著提升。

5 操作舒适性与机械可靠性协同优化

5.1 协同优化模型构建

构建操作舒适性与机械可靠性协同优化模型,明确目标、变量与约束条件。目标包括操作舒适性(操作力度最小、行程合理、调节平稳)与机械可靠性(构件磨损小、强度大、自锁可靠)。设计变量有传动比、齿轮模数等。约束条件含操作力度、行程、加速度变化率等限制。用加权求和法将多目标优化转为单目标,设两者权重均为 0.5 实现均衡优化。

5.2 协同优化算法求解

用遗传算法求解模型,其全局搜索与适配性好,能解复杂多目标问题。设种群规模 50、迭代 100 次、交叉概率 0.8、变异概率 0.05。以设计变量为基因建初始种群,通过适应度函数计算个体适应度值,经选择、交叉、变异生成新种群,迭代至最优解。求解得最优参数,应用于传动机构优化设计,提升操作舒适性与机械可靠性。

5.3 协同优化效果验证

通过综合性能测试验证效果,指标含操作舒适性与机械可靠性。结果显示,优化后操作力度 15N - 28N,行程缩短 25%,调节平稳;连续操作 10 万次,传动精度降 3%,磨损 0.02mm,自锁可靠;1.5 倍额定载荷下强度达标。与单一优化比,协同优化使传动机构在两方面达最优,无制约,综合性能提升。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本文围绕手动调节护理床传动机构的操作舒适性与机械可靠性优化开展研究,得出以下结论:操作舒适性核心需求为

操作力度、行程、平稳性与便捷性,机械可靠性核心需求为结构强度、耐磨性、自锁可靠性与稳定性,两者相互关联制约,需建立协同优化机制。

提出操作舒适性优化方法,结合分级传动比优化、操作输入模块人体工学设计与传动平稳性改进,能降低操作阻力、缩短行程、提升平稳性,优化后操作力度 15N - 28N,符合人体工学,舒适性显著提升。

提出机械可靠性优化方法,结合材料选型与表面强化、结构拓扑优化、自锁机构改进与润滑系统优化,能提升耐磨性、结构强度与自锁可靠性,优化后连续操作 10 万次仍保持良好性能,可靠性显著提升。

构建协同优化模型,用遗传算法求解得到最优参数,实现两者均衡优化。综合性能测试表明,优化后的传动机构性能优异,能满足基层养老护理需求,完善了优化设计理论体系,提供了技术支撑。

6.2 未来展望

未来研究可从以下方向深化:

传动机构创新方面,探索发条式、弹性储能等新型助力传动结构应用,降低操作阻力;研究自适应传动比技术,适配不同护理人员需求。

材料与工艺优化方面,探索碳纤维复合材料应用,降低机构重量、提升耐磨性;研究 3D 打印技术用于个性化构件制造,实现定制化设计。

智能监测与维护方面,引入微型传感器监测磨损与应力,实时评估可靠性,异常时提醒维护;结合物联网实现远程监控,提升维护效率。

产业化与标准化方面,推动操作舒适性与机械可靠性标准化研究,制定标准规范;加强产学研合作,降低成本,推动成果产业化;开展市场验证,根据反馈优化性能,提升竞争力。通过多维度创新推广,为基层养老护理提供优质可靠设备,推动养老服务产业普惠化发展。

参考文献:

- [1] 石元伍,严晗. 基于 KANO 模型和 TRIZ 理论的失能老人社区护理床设计研究[J]. 包装工程,2025,46(10):139-148.
- [2] 周红宇,王宏丽,陈悦. 基于用户需求的居家护理床设计研究[J]. 家具与室内装饰,2022,29(2).
- [3] 周忠仁,俞成涛,周翔宇,等. 新型护理床椅的背板机构设计及分析[J]. 机械传动,2022,46(3):74-80.
- [4] 付玉敏,胡国清,陈莹莹. 多功能护理轮椅床结构设计及机构运动分析[J]. 机械设计与制造工程,2018,(1).
- [5] 韩富,李璐,李维. 多功能护理病床侧身功能改进设计[J]. 科学技术创新,2022,(23).